



TITLE:

Three-dimensional Coupled-wave Analysis of External Reflection in Photonic Crystal Lasers(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

John, Gellela

CITATION:

John, Gellela. Three-dimensional Coupled-wave Analysis of External Reflection in Photonic Crystal Lasers. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20090>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（工学）	氏名	John Gellea
論文題目	Three-dimensional Coupled-wave Analysis of External Reflection in Photonic Crystal Lasers（フォトリック結晶レーザにおける外部反射の三次元結合波理論による解析）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>This work presents a three-dimensional coupled-wave analysis on the effects of external reflection in large-area, high-power, single-mode band-edge photonic crystal (PC) lasers, and furthermore applies such reflection toward the development of novel edge-emitting PC lasers.</p> <p>The first chapter introduces the research background and unique functionalities of the PC laser, as well as the forthcoming contributions of the present work to its development. Until now, only PC lasers with negligible reflection at the periphery of the PC have been considered. However, the application of finite reflection to this periphery is expected to enhance various laser characteristics, such single-mode stability, as well as enable the development of a novel, edge-emitting PC laser. This work presents a theoretical analysis of such external reflection using three-dimensional coupled-wave theory (3DCWT).</p> <p>The second chapter outlines the operating principle, device structure, and semi-analytical 3D coupled-wave model of a near-infrared PC laser. Resonance at the Γ_2 band edge of the embedded square-lattice PC of this laser is considered. External reflection is introduced into the semi-analytical model as the boundary conditions of a set of four differential coupled-wave equations. The chapter closes with the derivation of optical loss from the edges and surface of the PC.</p> <p>The third chapter opens with an analysis of PC lasers featuring conventional circular air holes in order to simply and concisely explicate the effects of external reflection on the resonant mode. This analysis reveals that the frequency, threshold gain, and profile of the resonant mode depends on the reflectivity and reflection phase at the boundary, and that the suitable design of the reflectivity and reflection phase can widen the threshold gain margin between the lowest-threshold (lasing) and next-lowest-threshold (competing) modes and thereby stabilize single-mode operation. Furthermore, external reflection is applied toward the design of an edge-emitting PC laser, upon which efficient, yet weak emission from a single edge is achieved.</p> <p>The fourth chapter aims to increase the emission strength of an edge-emitting PC laser by adopting a twin-hole PC design. This twin-hole design suppresses the</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	John Gellela
<p>backward diffraction of the resonant mode, which flattens the mode profile and consequently strengthens the single-edge emission by over a factor of ten, albeit at the cost of higher optical loss from the surface of the PC. Separately, an analysis of external reflection in a state-of-the-art surface-emitting PC laser with right-angle-isosceles triangular air holes is performed. This surface-emitting laser does not typically feature a current confinement structure, which is useful for enhancing the electrical-to-optical power conversion efficiency of the laser. The analysis is performed in anticipation of the optical reflection that such a confinement structure will bear on the resonant mode.</p> <p>The fifth chapter is devoted to enhancing the emission efficiency of an edge-emitting PC laser by shifting the point of resonance from the Γ_2 band edge to the M_1 band edge. At the M_1 band edge, emission from the surface of the PC is forbidden, so a higher edge emission efficiency is expected. Upon expanding 3DCWT to the M_1 band edge, a PC with four air holes within its unit cell and external reflection at three of its boundaries is considered for achieving (1) single-mode, (2) high-power, and (3) efficient single-edge emission. Although strong emission from all edges and zero surface emission is achieved by virtue of M-point resonance, the simultaneous satisfaction of the above three performance metrics is revealed to be difficult due to weak two-dimensional coupling of the resonant mode, which precipitates competition between the lasing and competing modes at even moderate edge reflectivities and hence degrades mode discrimination.</p> <p>The sixth chapter summarizes the results of the preceding four chapters and outlines the prospects of future research on external reflection in a PC laser. The design of realistic reflectors with tunable reflectivities and reflection phases, as well as strategies for enhancing the performance of an edge-emitting PC laser are proposed as two future research topics. In particular, tunable reflection is expected be possible with distributed Bragg reflectors or high-order PCs, and the mode discrimination of an edge-emitting PC laser is expected to improve using a triangular-lattice PC, which ought to have intrinsically stronger two-dimensional coupling than the square-lattice PCs considered in this work.</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、大面積・高出力化可能という特長を有するフォトニック結晶レーザにおける、外部反射の効果を解析し、さらに外部反射を利用した新規高出力端面発光型レーザの検討を行った結果をまとめたものである。フォトニック結晶レーザは、半導体レーザ中の活性層の極近傍に、周期的な構造をもつフォトニック結晶構造を形成した、新規の半導体レーザである。これまで、フォトニック結晶レーザにおいては、共振器の端面における反射が小さい構造が考えられてきたが、端面反射を積極的に利用することで、発振の安定化、さらには1つの端面のみから光を取り出す端面出射型フォトニック結晶レーザの実現などの新たな展開が期待できる。そこで本研究では、フォトニック結晶レーザの端面に外部反射を導入した構造について、3次元結合波理論を用いた解析を行った。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 面発光型フォトニック結晶レーザにおける外部反射の効果について解析を行い、共振モードの閾値利得が、端面反射率および反射位相により変化すること、さらに、これらを適切に設定することにより、競合するモードとの閾値利得差を拡大し、より安定した発振が可能となることを明らかにした。
2. 外部反射を積極的に利用した、端面出射型のフォトニック結晶レーザを提案し、実現に向けた理論検討を行った。単位格子内に二つの孔を配置するダブルホール構造を導入することにより、 180° 方向の回折を抑制できるため、大きな端面放射が得られるという結果を得た。また、端面出射型のフォトニック結晶レーザでは不要となる、面垂直方向への放射を抑制するために、従来のフォトニック結晶レーザで用いられてきた Γ 点と呼ばれる共振点から、 M 点と呼ばれる、面垂直方向への放射が原理的に生じない対称点における共振点を用いることを検討した。発振点を変更した新たな結合波理論を展開するとともに、格子点形状として、単位格子内に四つの孔を配置する構造を導入するなどの設計を行うことで、大きな端面放射と面発光の抑制が可能となることを明らかにした。

以上のように、本論文は、フォトニック結晶レーザにおける外部反射の効果を世界で初めて理論的に明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年12月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。